

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕЧАТНОЙ МАШИНЫ

The system of the two-motor interconnected electric drive on the basis of asynchronous machine with a squirrel cage for a drive of two-unit presses is offered. Work of the electric drive is checked up by means of the original mathematical model developed in Matlab 6.5.

Введение. В настоящее время для многокрасочных печатных машин наметилась тенденция к переходу от группового трансмиссионного электропривода к индивидуальному электроприводу отдельных печатных секций. Применение индивидуального привода для каждой печатной секции позволяет уменьшить металлоемкость печатных машин за счет уменьшения количества кинематических передач, увеличить КПД привода, ускорить проведение подготовительных операций. Но, в первую очередь, такое построение печатных секций улучшает модульность печатных машин, что позволяет формировать печатные машины нужной красочности.

Замена группового трансмиссионного электропривода индивидуальными электроприводами отдельных печатных секций ставит вопрос о синхронизации печатных цилиндров отдельных секций по скорости и положению.

Предполагается, что проблема синхронизации углов вращения валов электродвигателей, не связанных механически, может быть решена за счет электрического соединения силовых цепей электродвигателей, по которым должна передаваться электрическая мощность, обеспечивающая синхронизирующий электромагнитный момент. Управление этой мощностью и будет выполнять необходимые задачи синхронизации по угловому положению и по угловому вращению исполнительных механизмов для двух и более печатных секций печатной машины.

1. Устройство двухдвигательного взаимосвязанного электропривода. Электрическая схема электропривода двухкрасочной листовой печатной машины Dominant 725р представлена на рис. 1. Управляемый многокрасочный электропривод состоит из двух асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, питающихся от индивидуальных инверторов напряжения, соединенных последовательно. Питание инверторов производится от общего управляемого выпрямителя. На вход каждого из инверторов подается напряжение:

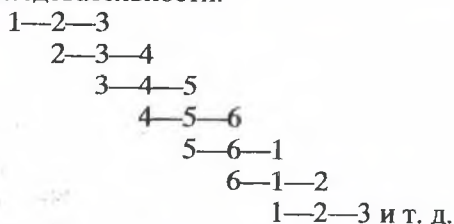
$$U_{и1} = U_{и2} = \frac{U_d}{2},$$

где U_d — напряжение на выходе общего выпрямителя. Нижняя группа транзисторов одно-

го инвертора последовательно соединена с верхней группой транзисторов второго инвертора через шунт, измеряющий входной ток инверторов.

Значение амплитуды напряжения переменного тока на выходе инверторов определяется значением выпрямленного напряжения U_d , из которого формируются выходные напряжения преобразователей. Значение U_d задается сигналом на входе системы управления выпрямителем (СУВ). Значение частоты выходного напряжения каждого из инверторов задается системой управления инвертора (СУИ). Регулирование скорости электродвигателей производится путем согласованного изменения частоты на выходе и амплитуды напряжения на входе инверторов.

Формирование выходного напряжения инверторов происходит путем поочередного включения IGBT-транзисторов в следующей последовательности.



Период выходного напряжения формируется шестью переключениями транзисторов. Таким образом, частота выходного напряжения инвертора определяется частотой переключения его силовых ключей. В каждый данный момент времени всегда замкнуты три ключа в каждом инверторе. В результате такого алгоритма оказываются соединенными последовательно фазные обмотки двигателей.

С каждым переключением транзисторов изменяется схема подключения фаз статорных обмоток двигателей к источнику постоянного напряжения. Как отмечается в [1], в зависимости от характера нагрузки в течение каждого переключения каждая фаза статорной обмотки электродвигателя может быть трижды присоединена к полюсу источника питания или через включенный транзистор, или через диод обратного тока. Однако в течение одного переключения конфигурация цепи не меняется, не зависимо от того, через диод или транзистор подключена фаза двигателя к какому-либо полюсу источника постоянного тока.

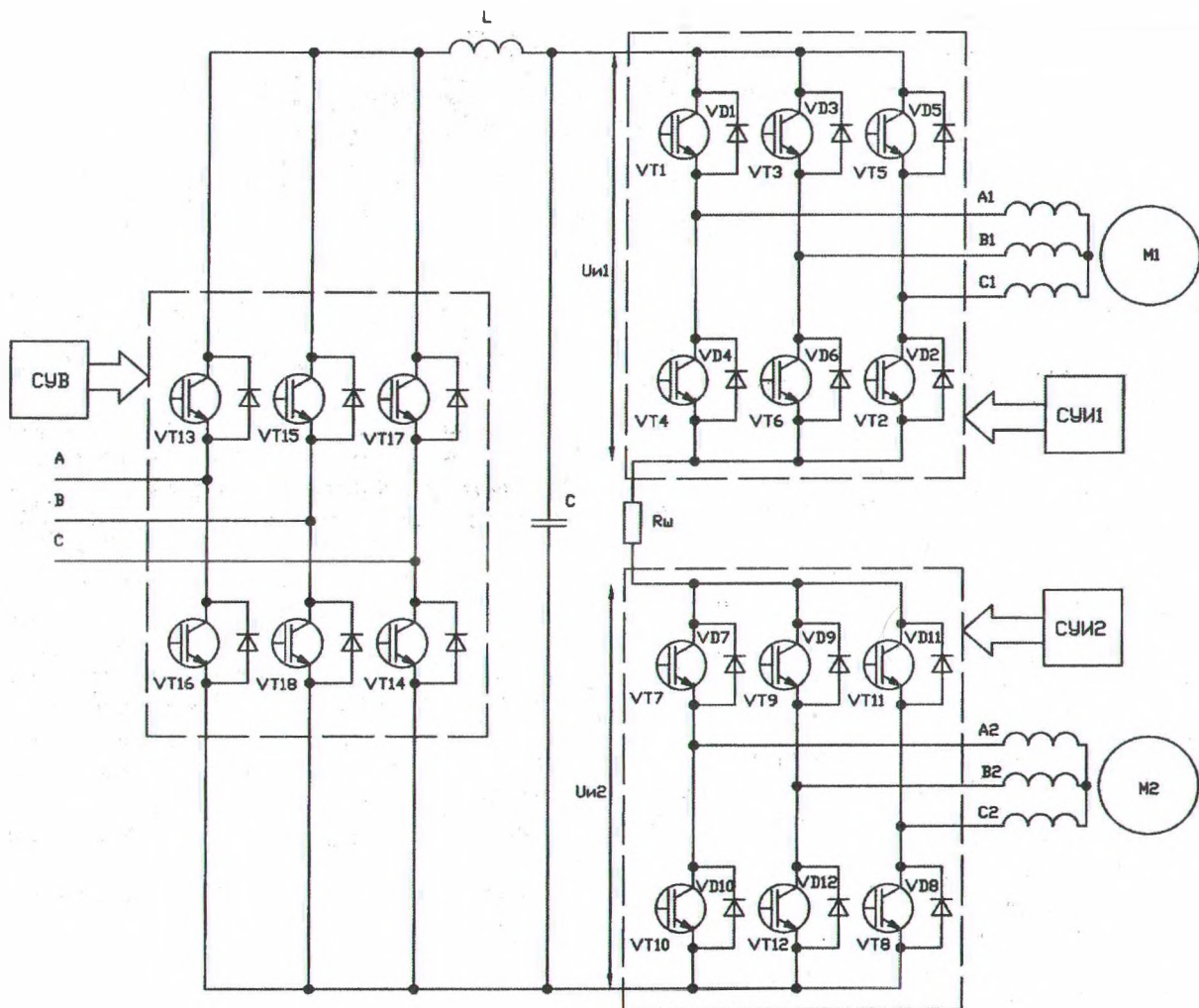


Рис. 1. Схема двухдвигательного электропривода

Поскольку период выходного напряжения инвертора составляет 2π , а сам период формируется из шести переключений, то длительность одного такого переключения составляет:

$$\Delta\Theta = \frac{2\pi}{6} = \frac{\pi}{3}.$$

На каждом интервале растет угол поворота магнитного поля Θ_1 и при достижении им значения угла переключения

$$\Theta_n = \frac{2\pi}{6} = \frac{\pi}{3}$$

происходит переключение транзисторов и переход к новому интервалу, на котором снова возрастает угол Θ_1 от 0 до Θ_n .

Пример схемы двухдвигательного взаимосвязанного электропривода на одном из интервалов с указанием протекающих по цепям токов представлен на рис. 2.

2. Построение математической модели двухдвигательного взаимосвязанного электропривода. При моделировании асинхронного электропривода широко применяется метод обобщающих векторов, являющийся наиболее строгим и универсальным при анализе переходных и периодических процессов [1]. На практике широко применяется неподвижная система координат $\alpha-\beta$ теории обобщенной машины, что удобно для описания работы асинхронного электродвигателя, питающегося несинусоидальным напряжением.

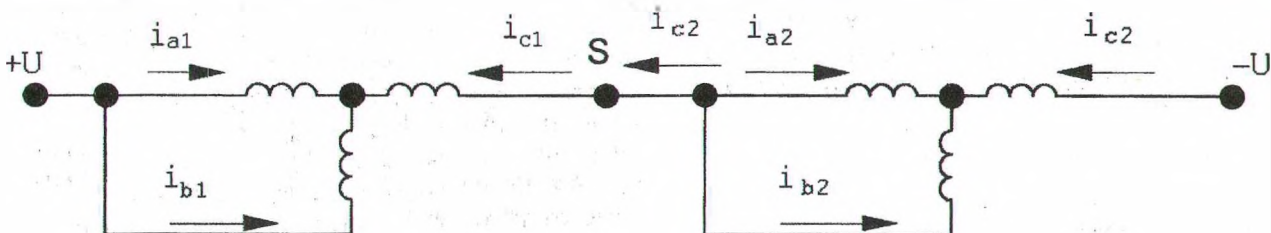


Рис. 2. Вариант схемы электропривода при включенных транзисторах 1-2-3 и 7-8-9

Однако в [2] указывается, что при несинусоидальных напряжениях приводить машину к двухфазной системе координат неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин в этих условиях отличаются друг от друга.

Уравнения трехфазной машины в преобразованной системе координат имеют вид:

$$u_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt};$$

$$u_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt};$$

$$u_{s\gamma} = R_s \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt};$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}}{\sqrt{3}} \cdot \omega_r;$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\beta} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + \frac{\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}}{\sqrt{3}} \cdot \omega_r;$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + \frac{\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}}{\sqrt{3}} \cdot \omega_r.$$

В этих уравнениях u — фазное напряжение; i — фазный ток; R — активное сопротивление фазы; Ψ — результирующее потокоцепление; ω — скорость вращения ротора; s — индекс для величин, относящихся к цепи статора; r — индекс для величин, относящихся к цепи ротора; α, β, γ — индексы, указывающие, в проекциях на какую ось записано данное уравнение.

Выражения для проекций потокоцеплений на координатные оси $A-B-C$, неподвижные относительно статора, имеют следующий вид:

$$\Psi_{sa} = L_s \cdot i_{sa} + L_m \cdot i_{ra};$$

$$\Psi_{sb} = L_s \cdot i_{sb} + L_m \cdot i_{rb};$$

$$\Psi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + L_m \cdot i_{rc};$$

$$\Psi_{ra} = L_r \cdot i_{ra} + L_m \cdot i_{sa};$$

$$\Psi_{rb} = L_r \cdot i_{rb} + L_m \cdot i_{sb};$$

$$\Psi_{rc} = L_r \cdot i_{rc} + L_m \cdot i_{sc};$$

где L_s — индуктивность статора; L_r — индуктивность ротора; L_m — главная индуктивность (индуктивность намагничивающего контура) [3].

Выражение для электромагнитного момента имеет вид

$$M_d = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot p \cdot L_m \cdot \left[\begin{aligned} &(i_{sa}i_{rc} + i_{sb}i_{ra} + i_{sc}i_{rb}) - \\ &-(i_{sa}i_{rb} + i_{sb}i_{rc} + i_{sc}i_{ra}) \end{aligned} \right].$$

Для привода одной секции машины Dominant 725p используется трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 2,2 кВт. Его

параметры (активные сопротивления статора R_s и ротора R_r , индуктивности статора L_s и ротора L_r , а также индуктивность намагничивающего контура L_m) рассчитаны в [4] по методике, приведенной в [5].

Для математической модели двухдвигательного электропривода используются уравнения роторных цепей из теории обобщенной машины. Уравнения для цепей статоров получаем на основании первого и второго законов Кирхгофа. По первому закону Кирхгофа для каждого из двигателей справедливы выражения:

$$i_{sa1} + i_{sb1} + i_{sc1} = 0;$$

$$i_{sa2} + i_{sb2} + i_{sc2} = 0.$$

Продифференцируем их по времени:

$$\frac{d}{dt}i_{sa1} + \frac{d}{dt}i_{sb1} + \frac{d}{dt}i_{sc1} = 0;$$

$$\frac{d}{dt}i_{sa2} + \frac{d}{dt}i_{sb2} + \frac{d}{dt}i_{sc2} = 0.$$

Четыре недостающих уравнения зависят от текущей схемы соединения статорных обмоток и входного напряжения инверторов, т. е. от включенных в данный момент времени транзисторов. Покажем пример составления этих уравнений для варианта, когда в первом инверторе включены транзисторы 1–2–3, а во втором — транзисторы 7–8–9. В этом случае схема взаимосвязанного электропривода имеет вид, указанный на рис. 3.

Для составления уравнений воспользуемся вторым законом Кирхгофа. При этом за положительное направление тока принимаем направление к узлу нагрузки, соединенной по схеме «звезда». Составляем уравнения для трех контуров и узла соединения инверторов S. Для узла S по первому закону Кирхгофа:

$$-i_{c1} + i_{c2} = 0.$$

Продифференцировав по времени, получим:

$$-\frac{d}{dt}i_{c1} + \frac{d}{dt}i_{c2} = 0.$$

Для контуров уравнения имеют вид:

$$\left(i_{sa1} \cdot R_{s1} + \frac{d\Psi_{sa1}}{dt} \right) - \left(i_{sb1} \cdot R_{s1} + \frac{d\Psi_{sb1}}{dt} \right) = 0;$$

$$\left(i_{sa2} \cdot R_{s2} + \frac{d\Psi_{sa2}}{dt} \right) - \left(i_{sb2} \cdot R_{s2} + \frac{d\Psi_{sb2}}{dt} \right) = 0;$$

$$\begin{aligned} &\left(i_{sa1} \cdot R_{s1} + \frac{d\Psi_{sa1}}{dt} \right) - \left(i_{sc1} \cdot R_{s1} + \frac{d\Psi_{sc1}}{dt} \right) + \\ &+ \left(i_{sa2} \cdot R_{s2} + \frac{d\Psi_{sa2}}{dt} \right) - \left(i_{sc2} \cdot R_{s2} + \frac{d\Psi_{sc2}}{dt} \right) = U. \end{aligned}$$

Полученную систему уравнений дополним уравнениями движения для каждого из двигателей, составленными с учетом их электромагнитных моментов:

$$\frac{d}{dt} \omega_{r1} = \frac{1}{J_{\Sigma np1}} \cdot (M_{\Sigma 1} - M_{c1});$$

$$\frac{d}{dt} \omega_{r2} = \frac{1}{J_{\Sigma np2}} \cdot (M_{\Sigma 2} - M_{c2}).$$

В данных выражениях $J_{\Sigma np i}$ и $M_{c i}$ — соответственно суммарный приведенный момент инерции и момент сопротивления на валу i -го электродвигателя, где $i = 1; 2$.

Аналогичным образом получены системы дифференциальных уравнений для всех вариантов включения транзисторов. Далее дифференциальные уравнения приводятся к форме Коши и оформляются в виде функций $f_1, f_2, f_3, \dots, f_{13}, f_{14}$ для решения их в пакете Matlab 6.5. Решение систем дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге — Кутты четвертого порядка точности с постоянным шагом. Величина шага времени, в соответствии с рекомендациями в [2], составляет 185 мкс. Данная модель позволяет моделировать работу двух электродвигателей при неодинаковых частотах питающего их напряжения.

Чтобы учесть ограничения, накладываемые на систему дифференциальных уравнений при моделировании пуска, ее решение производится не штатными функциями Matlab, а оригинальными подпрограммами $mrk1, mrk2, mrk3$,

которые применяются на соответствующих участках расчета. Данные подпрограммы построены по методике, предложенной в [6] по схеме Рунге — Кутты. Они на основании значения угла поворота магнитного поля для каждого из двигателей определяют текущую схему включения транзисторов инвертора и выбирают соответствующие дифференциальные уравнения. По полученным уравнениям рассчитываются координаты электропривода с учетом накладываемых ограничений.

В головной программе Program осуществляется ввод данных и передача их подпрограммам $mrk1, mrk2, mrk3$. В конце расчета головная программа производит построение графиков, отображающих изменение координат электропривода во времени на протяжении пуска двигателей и их работы в установившемся режиме и при изменении нагрузки.

3. Моделирование динамики двухдвигательного взаимосвязанного электропривода. Для проверки устойчивости системы двухдвигательного электропривода моделируется его работа при оказании возмущающих воздействий на двигатели со стороны исполнительного механизма (печатных секций). Возмущающее воздействие заключается в том, что к валам двигателей прикладываются различные по величине моменты статического сопротивления. Причем больший момент нагрузки поочередно прикладывается к каждому из двигателей.

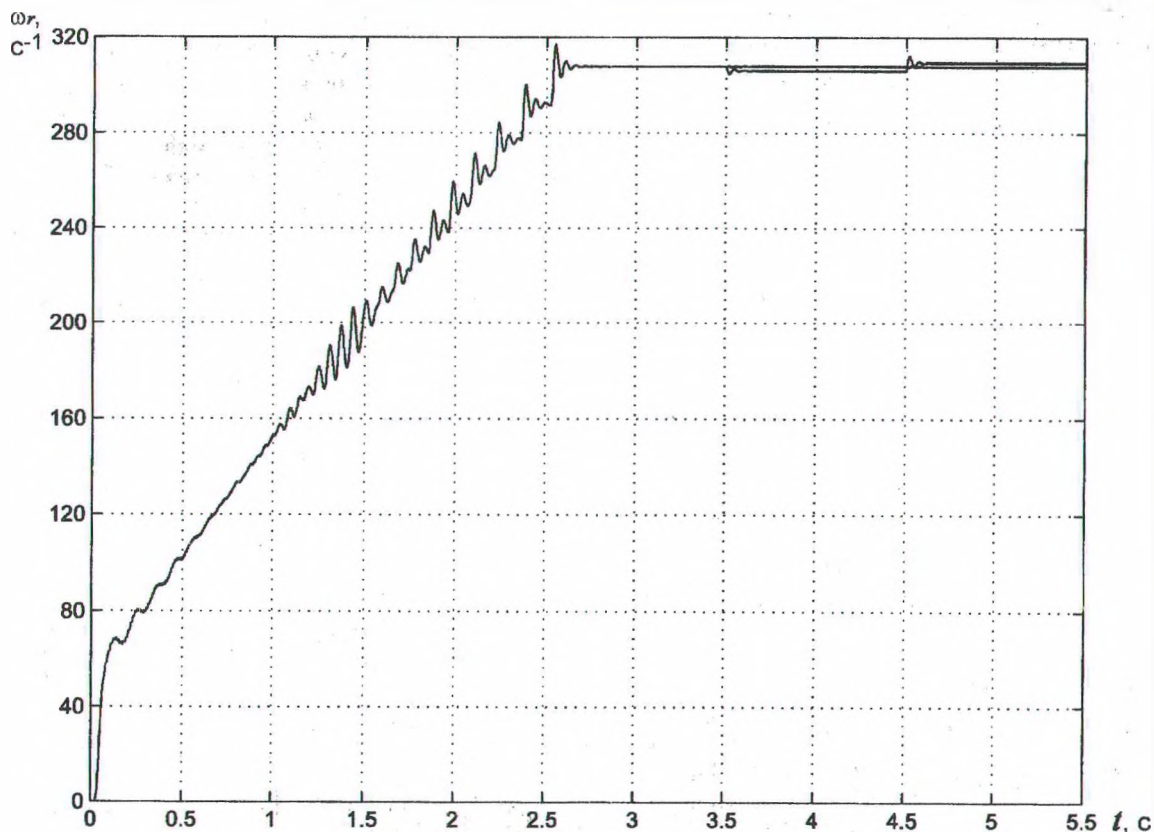


Рис. 3. График скоростей электродвигателей

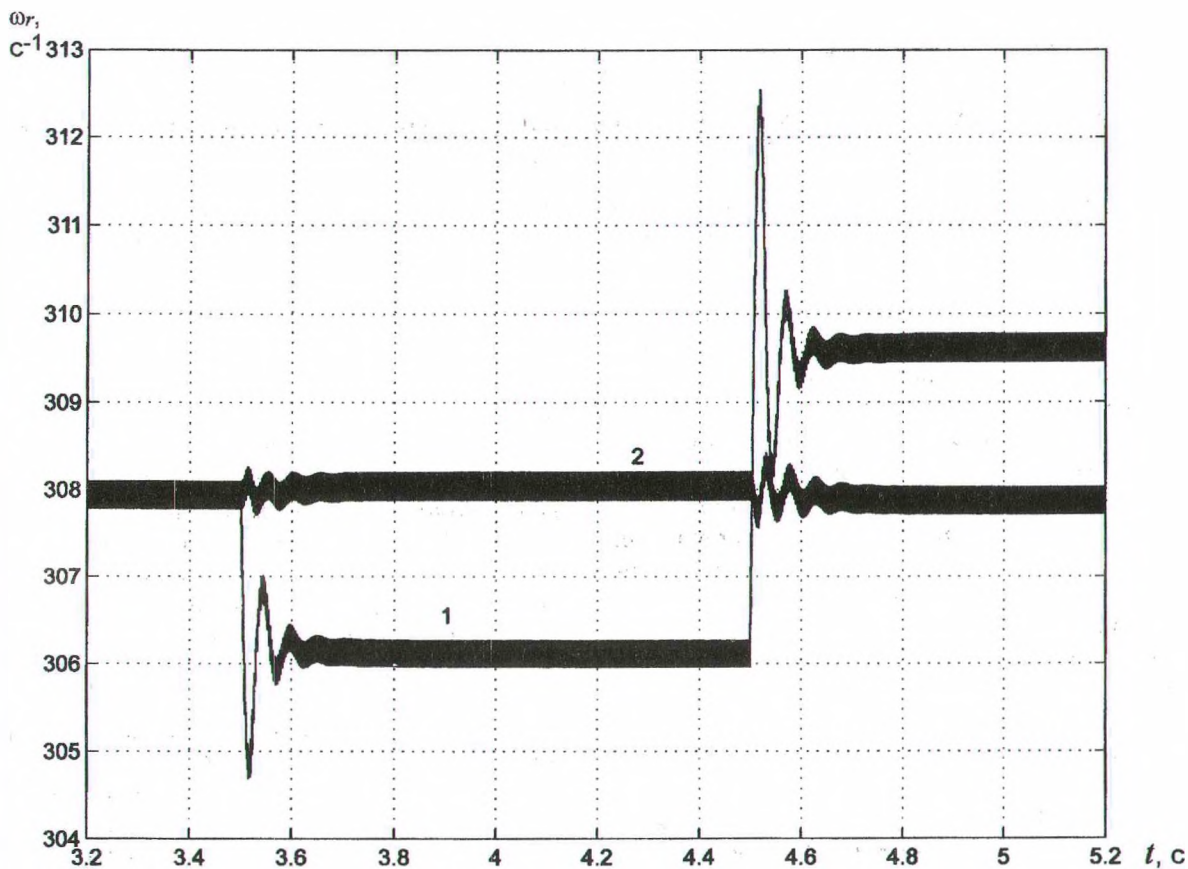


Рис. 4. График скоростей двигателей при изменении нагрузки

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения скоростей роторов электродвигателей при частотном пуске (время от 0 до 2,54 с), установившемся движении (время от 2,54 до 3,5 с) с одинаковыми моментами статического сопротивления на валах двигателей. Далее моделируется работа взаимосвязанного двухдвигательного электропривода при различных значениях момента статического сопротивления на валах двигателей (время от 3,5 до 5,5 с).

Изменение момента статического сопротивления на валу первого электродвигателя на $\pm 25\%$ от номинального значения вызывает изменение его скорости на $\pm 0,56\%$ (график 1 на рис. 4). Переходные процессы, возникающие в результате реакции на скачкообразные изменения момента сопротивления, затухают за время, равное 0,2 с, без оказания каких-либо синхронизирующих воздействий со стороны системы управления электроприводом.

Вывод. Полученная математическая модель асинхронного электропривода, построенная на основании теории обобщенной машины, позволяет изучать реальные электромагнитные процессы, происходящие в нем при питании несинусоидальным напряжением от автономных инверторов напряжения. А результаты моделирования подтверждают работоспособность предлагаемой системы взаимосвязанного двухдвигательного электропривода.

Литература

1. Структуры систем управления автоматизированным электроприводом / О. П. Ильин [и др.]; под ред. А. Л. Галкина. — Минск: Наука и техника, 1978. — 368 с.
2. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов по спец. «Электрические машины» / И. П. Копылов. — М.: Высш. шк., 1987. — 248 с.
3. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. / Г. Г. Соколовский. — М.: ACADEMIA, 2006. — 266 с.
4. Анкуда, Д. А. Исследование и оптимизация электропривода многокрасочных печатных машин по системе «Электрический вал»: дис. ... магистра техн. наук: 1-36.06.01; защищена 29.06.05 / Д. А. Анкуда. — Минск, 2005. — 52 с.
5. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами: учеб.-метод. пособие для студентов специальностей 1-36 06 01 «Полиграфическое оборудование и системы обработки информации», 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производства» / сост. В. П. Беляев, Л. М. Давидович. — Минск: БГТУ, 2004. — 82 с.
6. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. — М.: Наука, 1978. — 512 с.